

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

DAIRONE QUEIROZ DE SOUSA



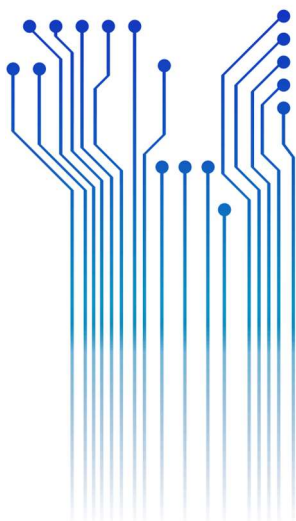
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS
DO SOLO QUANDO SUBMETIDO A IMPULSOS DE TENSÃO**



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande – Paraíba - Brasil
Dairone Queiroz de Sousa, agosto de 2018

DAIRONE QUEIROZ DE SOUSA

*ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO
QUANDO SUBMETIDO A IMPULSOS DE TENSÃO*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Ronimack Trajano de Souza, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba, agosto de 2018

DAIRONE QUEIROZ DE SOUSA

*ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO
QUANDO SUBMETIDO A IMPULSOS DE TENSÃO*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em 09/08/2018

Jalberth Fernandes de Araújo
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Ronimack Trajano de Souza, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe e à minha avó. Dalvanira e Josefa, e também à minha bisavó Maria (in memoriam) por ter sempre me apoiado e ter feito tudo possível para a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e à minha avó, Dalvanira e Josefa, pela base sólida que me proporcionaram, pelo amor, cuidados e sacrifícios que têm feito por mim e por acreditarem e me apoiarem ao longo desta jornada.

Agradeço a Deus pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço a minha bisavó Maria (in memoriam) pelo cuidado que sempre teve com toda a família, nunca deixando faltar o alimento e sendo um exemplo de trabalho e integridade.

Agradeço ao meu tio José Cláudio por ter sido como um pai que eu nunca tive, me acolhendo e dando sempre todo apoio.

Agradeço a minha tia Cícera pelo carinho demonstrado e por sempre está à disposição quando precisei.

Agradeço a minha namorada, Elane, pelo incentivo e conselhos dados durante essa longa caminhada.

Agradeço ao meu orientador, Ronimack Trajano de Souza, por toda a ajuda dada a mim para elaboração deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“ Nossa maior fraqueza está em desistir.
O caminho mais seguro para o sucesso
é sempre tentar apenas uma vez mais.”*

Thomas Edison.

RESUMO

Os parâmetros elétricos do solo (condutividade e permissividade elétrica) influenciam diretamente no desempenho de malhas de aterramento, especialmente em situações transitórias ocasionadas pela incidência de descargas atmosféricas. Na literatura, tais parâmetros são usualmente considerados independentes da frequência, com condutividade (σ) constante, e permissividade (ϵ) que pode ser desprezada. Entretanto, diante de fenômenos transitórios rápidos de caráter impulsivo, apresentam um comportamento singular, diferente do comportamento em baixas frequências (50 Hz ou 60 Hz), variando em uma ampla faixa de frequência presente nesses sinais. Portanto, torna-se necessário o conhecimento do comportamento do solo diante dessas situações. Neste trabalho é feita a análise do comportamento da condutividade e da permissividade elétrica do solo quando submetido à impulsos de tensão, e é apresentada uma metodologia que emprega um sistema para ensaio dos parâmetros elétricos do solo desenvolvido especialmente para esse fim.

Palavras-chave: Parâmetros elétricos do solo, impulso de tensão, condutividade, permissividade elétrica.

ABSTRACT

The electrical parameters of the soil (conductivity and electrical permittiveness) directly influence the performance of grounding grids, especially in transient situations caused by the incidence of atmospheric discharges. In literature, such parameters are generally independent of frequency, with constant conductivity (σ), and permittiveness (ϵ) that can be neglected, however, in the presence of rapid transient impulsive character phenomena, presents a singular behavior, varying in a frequency scale present in these signs. Therefore, it becomes necessary to study the state of the soil in these situations. In this work is made an analysis of the conductivity and electrical permittiveness behavior of the soil subjected to voltage pulses, and it is presented a methodology that shows a system for testing the electrical parameters of the soil specially developed for this purpose.

Keywords: Electrical parameters of the soil, voltage pulses, conductivity, electrical permittiveness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de um sistema de aterramento.	15
Figura 2: Circuito equivalente de uma pequena parte do aterramento elétrico.	15
Figura 3: Resultados obtidos por Portela (1997).	17
Figura 4: Resultados obtidos por Bosco (2005).	17
Figura 5: Resultados obtidos por Silva (2013).	18
Figura 6: Representação esquemática do comportamento de (a) ε' e (b) ε'' considerando um meio submetido a um campo de frequência variável.	20
Figura 7: Impulso de tensão pleno.	23
Figura 8: Impulso de tensão cortado na cauda.	23
Figura 9: Impulso de tensão cortado na frente de onda.	24
Figura 10: Esquema representativo do circuito elétrico do gerador.	25
Figura 11: Representação esquemática do solo para medição.	26
Figura 12: Sistema para ensaio dos parâmetro elétricos do solo.	27
Figura 13: Esquema para a realização da medição.	29
Figura 14: Fotografia da montagem para realização das medições.	30
Figura 15: Fotografia do gerador de impulso utilizado.	30
Figura 16: Sistema desenvolvido com a indicação das dimensões.	31
Figura 17: Fotografia do sistema desenvolvido.	32
Figura 18: Eletrodos para aplicação e medição de tensão.	32
Figura 19: Fotografia dos eletrodos para aplicação e medição de tensão.	33
Figura 20: Fotografias: (a) etapa de montagem da caixa; (b) eletrodo para aplicação de tensão fixado na caixa; (c) processo de construção dos eletrodos para medição de tensão; (d) processo de construção dos eletrodos para aplicação de tensão.	34
Figura 21: Impulso de tensão aplicado na amostra do solo.	35
Figura 22: Gráficos da condutividade e permissividade relativa da amostra do solo em função da frequência:	36
Figura 23: Gráfico da parte imaginária da admitância da amostra do solo ($\omega\varepsilon$) em função da frequência.	37
Figura 24: Fotografia da montagem para o ensaio diretamente no solo.	38
Figura 25: Gráfico das medições da (a) Queda de tensão e (b) corrente feitas no ensaio realizado diretamente no solo.	39
Figura 26: Gráfico das medições da (a) Queda de tensão e (b) corrente feitas no ensaio realizado no sistema desenvolvido.	40

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Organização do trabalho	12
2	Fundamentação Teórica	12
2.1	Características elétricas do solo	12
2.2	Sistemas de aterramento	13
2.3	Dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo	16
2.3.1	Permissividade elétrica.....	18
2.3.2	Condutividade elétrica.....	20
2.4	Impulso de Tensão	21
2.4.1	Formas de Impulso	22
2.4.2	Princípio de geração de impulso de tensão	24
3	Material e métodos.....	26
3.1	Metodologia	26
3.2	Material.....	30
3.2.1	Gerador de impulso	30
3.2.2	Sistema desenvolvido para realizar ensaio dos parâmetros elétricos do solo	
	31	
3.3	O solo utilizado	34
4	Análise dos resultados	35
4.1	Análise dos valores dos parâmetros elétricos obtidos	36
4.2	Influência da preservação da estrutura física original do solo nos resultados obtidos.....	38
5	Conclusão.....	41
	Referências	42

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos estão submetidos a várias formas de fenômenos transitórios de caráter impulsivo, envolvendo variações súbitas de tensão e corrente provocadas por descargas atmosféricas e operação de disjuntores.

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que consistem em um fluxo de corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração com amplo espectro de frequência, de 0 a até 2 MHz, cujo percurso é normalmente de alguns quilômetros (Bosco, 2005). Tais impulsos podem ser simulados em laboratório utilizando um gerador de impulsos, cujos sinais produzidos são caracterizados por um rápido crescimento e lento decaimento com diferentes tempos de frente e amplitudes.

A ocorrência das descargas atmosféricas pode gerar sobretensões na rede elétrica e conseqüentemente avarias ou danos permanentes aos equipamentos do sistema elétrico, provocando desligamentos das linhas de transmissão e distribuição (Freitas, 2015). Também se tem, com o mesmo potencial danoso, as sobretensões de manobra, cujos surtos de tensão apresentam oscilações amortecidas de alguns kHz, com duração de vários milissegundos a até vários ciclos e valores de pico máximos de 4 pu (Bosco 2005).

A proteção do sistema elétrico contra as sobretensões é realizada principalmente com a instalação de para-raios, os quais tem a função de limitar os níveis de sobretensão nos equipamentos conectados à rede elétrica, quando esta estiver submetida a sobretensões de manobra ou devido as descargas atmosféricas. Entretanto, a eficiência operacional do para-raios está diretamente associada à eficiência do aterramento ao qual o para-raios está conectado. Assim, se faz necessário o uso de um sistema de aterramento eficiente, capaz de fornecer às correntes conduzidas pelos para-raios durante a ocorrência do surto de tensão um caminho de baixa impedância para a terra, evitando que os mesmos não operem adequadamente, e garantir a segurança das pessoas e das instalações.

Isto posto, o comportamento elétrico do solo está diretamente relacionado com a proteção e segurança de pessoas e equipamentos, pois os parâmetros elétricos (condutividade e permissividade) do solo influenciam diretamente no desempenho de malhas de aterramento, especialmente em situações transitórias ocasionadas pela incidência de descargas atmosféricas.

Para caracterizar o comportamento elétrico do solo é necessário avaliá-lo sob condições transitórias e na frequência industrial, tendo em vista que quando solicitado por sinais impulsivos, semelhante ao da incidência de descargas atmosféricas, o solo apresenta comportamento bastante distinto daquele observado frente a sinais de frequência industrial, 50 ou 60 Hz (Bosco, 2005).

1.1 MOTIVAÇÃO

O comportamento dos aterramentos elétricos é capaz de influenciar significativamente a operação de sistemas elétricos durante certas ocorrências, sobretudo, quando estes sistemas são submetidos aos efeitos de descargas atmosféricas (Corrêa, 2008). Os critérios adotados em projetos de aterramentos de sistemas são bem definidos. Fundamentalmente, esses critérios referem-se ao aterramento submetido a eventos eletromagnéticos de baixas frequências.

É usual adotar valores constantes para os parâmetros elétricos do solo, resistividade e permissividade, nas avaliações do comportamento transitório de aterramentos elétricos. Normalmente, é atribuído para resistividade o valor medido utilizando instrumentos convencionais que empregam sinais de baixa frequência e para permissividade relativa um valor arbitrário, dependendo da umidade do solo. No entanto, a resistividade e a permissividade variam em uma ampla faixa de frequência (Bosco, 2005).

Para que um sistema de energia elétrica opere dentro de padrões específicos de continuidade, desempenho e segurança, exigidos em nível cada vez maior, é fundamental que o projeto de aterramento contemple também transitórios eletromagnéticos, pois os parâmetros elétricos do solo não permanecem constantes durante essas situações. Portanto, é essencial conhecer o comportamento elétrico do solo diante de fenômenos transitórios rápidos, como impulsos de tensão, visto que influenciam diretamente no desempenho de malhas de aterramento.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar as características da condutividade e da permissividade elétrica do solo quando submetido à impulsos de tensão de diferentes configurações de tempo e amplitudes.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um sistema para ensaios de condutividade e permissividade;
- Analisar o comportamento da condutividade e permissividade do solo em função das frequências presentes nos sinais impulsivos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2, apresenta-se uma fundamentação teórica acerca dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento do trabalho, mostrando a influência da condutividade e permissividade do solo nos sistemas de aterramento, bem como a influência da frequência em tais parâmetros elétricos. No capítulo 3 são descritas a metodologia proposta, o sistema desenvolvido para ensaio dos parâmetros elétricos do solo e os demais equipamentos utilizados. No Capítulo 4, são apresentados os resultados e análises sobre os ensaios realizados na amostra do solo submetida a impulsos de tensão. Para finalizar, o capítulo 5 é dedicado à conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO

No sentido usual, pode ser considerado solo todo material da crosta terrestre, originado pela destruição natural das rochas pelos agentes do intemperismo e em contato com a atmosfera (FLEURY, 1995). A partir do momento em que se inicia a incorporação da matéria orgânica à matéria mineral e também à proliferação dos microrganismos, que são constituídos de fungos e bactérias, forma-se o solo agrícola.

O solo tem uma composição bastante heterogênea, sendo que o valor de seus parâmetros elétricos (condutividade e permissividade) pode variar de local para local em função do tipo, do nível de umidade, da profundidade das camadas, da idade de formação geológica, da temperatura, da salinidade e de outros fatores naturais, além de fatores externos como contaminação e compactação (ABNT NBR 7117, 2012).

Na sua grande maioria, os solos são formados por diversas camadas de resistividades e profundidades diferentes. Essas camadas, devido à formação geológica, são normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo. Entretanto, existe também casos em que, devido alguma falha geológica, as camadas se apresentam inclinadas e até mesmo verticais (Fleury, 1995).

Segundo Ulaby (2004), os parâmetros elétricos constitutivos de um material são a permissividade elétrica (ϵ), e a condutividade elétrica (σ). Eles expressam, sob um ponto de vista macroscópico, os efeitos resultantes da interação de campos elétricos com a matéria. Os materiais são classificados em condutores (metais) ou dielétricos (isoladores) de acordo com as magnitudes das suas condutividades. Um dielétrico perfeito é um material com $\sigma = 0$ e um condutor perfeito é um material com $\sigma \rightarrow \infty$.

Na maior parte dos casos o solo apresenta permeabilidade magnética próxima à do vácuo e, portanto, importa essencialmente, a caracterização dos parâmetros condutividade e permissividade elétricas (Silva, 2013). Ambos os parâmetros, se considerados campos estáticos ou quase estáticos, dependem de diversos fatores, tais como: i) tipo de solo; ii) umidade; iii) concentração e tipos de sais dissolvidos na água; iv) temperatura; iv) compactidade e granulometria do solo. Quando se consideram campos alternados, dentro de uma faixa desde frequências mais baixas (~100 Hz) até frequências mais elevadas (alguns MHz), as complexidades crescem e um número significativo de fatores adicionais pode influir no comportamento dos parâmetros citados (Silva, 2013).

2.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

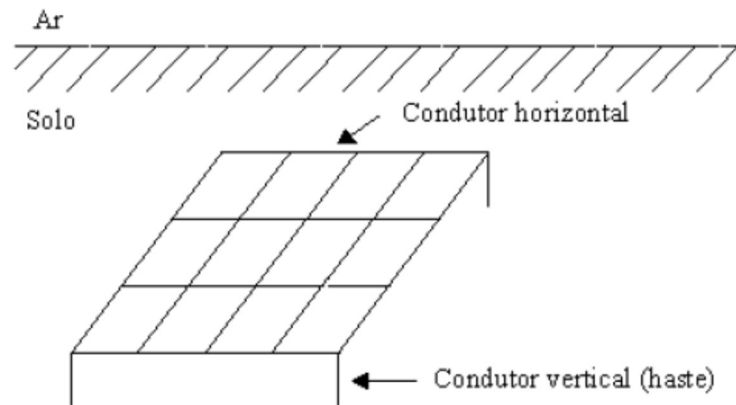
Aterramento elétrico é a conexão de parte eletricamente condutora à terra, através de infraestrutura metálica, intencionalmente prevista e composta por eletrodos, condutores e conexões, para atuar como referência de potencial elétrico e também como ente capaz de conduzir corrente elétrica (Laila, 2016). Sistemas elétricos, sejam eles de pequeno ou grande porte, podem operar momentaneamente em circunstâncias de falhas

ou perturbações. Nestes casos, correntes e tensões perigosas podem danificar equipamentos ou expor seres vivos a riscos. Como medida de mitigação destes riscos, malhas de aterramento são previstas. Segundo KINDERMANN e CAMPAGNOLO (2011), os principais objetivos do aterramento são:

- Obter uma resistência de aterramento mais baixa possível, para correntes de falta à terra;
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança determinados em norma de modo a não causar fibrilação ventricular no coração humano;
- Fazer que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento para terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno de corrente nos sistemas monofilares;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Um sistema de aterramento é composto basicamente pelas conexões elétricas que ligam o sistema a ser aterrado aos eletrodos, pelos eletrodos de aterramento propriamente ditos e pelo solo que envolve tais eletrodos. Para a avaliação do comportamento do aterramento frente a solicitações elétricas é importante modelar o meio em que os eletrodos estão inseridos, ou seja, o solo. A correta determinação de parâmetros típicos de projeto, tais como resistência de aterramento e distribuição de potenciais, depende diretamente solo, expresso por suas características eletromagnéticas. A Figura 1 apresenta um exemplo de um sistema de aterramento.

Figura 1: Exemplo de um sistema de aterramento.

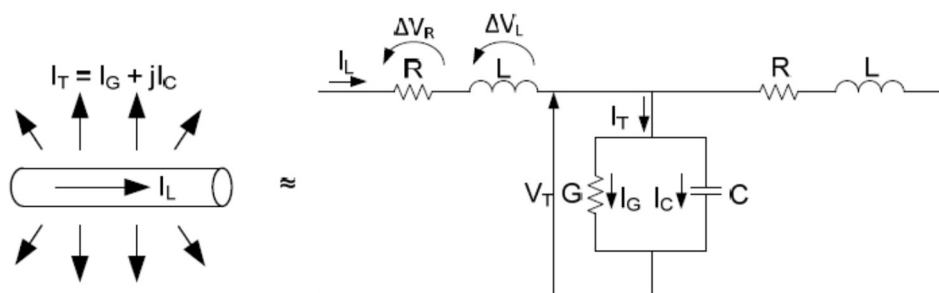


Fonte: Ramón (2005).

Os aterramentos, em geral, são modelados considerando-se os efeitos resistivo, indutivo e capacitivo, cada qual influenciando de forma específica a condução de corrente para a terra. Esses efeitos caracterizam a impedância de aterramento, que é um parâmetro importante para a compreensão da natureza do sistema de aterramento.

A impedância de aterramento pode ser entendida como a oposição oferecida pelo Aterramento à dispersão da corrente elétrica para o solo (Laila, 2016). Com o objetivo de ilustrar o conceito de impedância de aterramento, na Figura 2 é apresentado um circuito elétrico equivalente simplificado que representa uma pequena parte de um eletrodo de aterramento enterrado no solo. Esse elemento representativo de uma parte do eletrodo possui duas fontes de corrente distintas associadas: uma transversal, I_T , que é dispersada para o solo e uma longitudinal, I_L , que é transferida para o restante do eletrodo.

Figura 2: Circuito equivalente de uma pequena parte do aterramento elétrico.



Fonte: Laila (2016).

A corrente transversal está associada à dispersão de correntes condutivas e capacitivas para o solo. Esses efeitos são representados de forma equivalente na Figura 2

por meio de uma condutância G e uma capacitância C em paralelo. A corrente de condução I_G é proporcional à condutividade elétrica do solo, σ , estando em fase com a tensão transversal V_T , enquanto que a corrente de deslocamento ou capacitiva I_C é proporcional ao produto da frequência angular associada ao fenômeno solicitante pela permissividade elétrica do solo, $I_C = \omega \epsilon V_T$, estando defasada em relação à tensão transversal V_T de 90° . Vale mencionar que a relação entre essas correntes, condutiva e de deslocamento (ou capacitiva), não depende das características geométricas do eletrodo de aterramento e sim unicamente das propriedades do solo e da frequência.

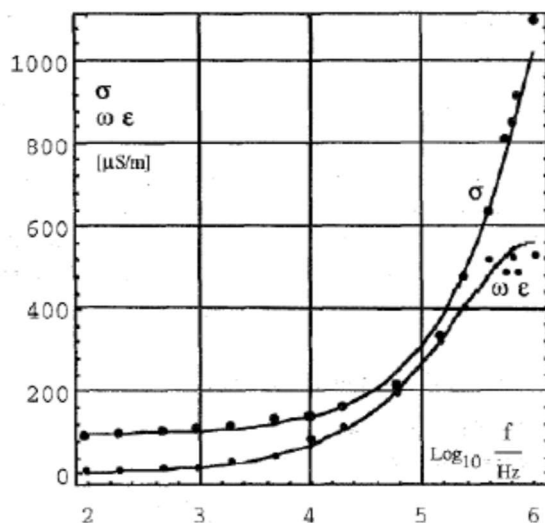
2.3 DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO

O solo se comporta como um meio dissipativo e exceto para campos elétricos extremamente intensos, onde ionização significativa ou fenômeno de ruptura podem ocorrer, seu comportamento eletromagnético é essencialmente linear, porém, com condutividade elétrica, σ , e permissividade, ϵ , fortemente dependentes da frequência (Portela, 1997).

Para fenômenos rápidos, especificamente associados às descargas atmosféricas, a variação em função da frequência dos parâmetros do solo é significativa na faixa de 0 a 2 MHz, tendo influência direta na determinação de parâmetros de linhas de transmissão, estudos de distribuições de correntes impulsivas e tensões induzidas em malhas de aterramento (Bosco, 2005).

Nos resultados obtidos por Portela (1997) e Bosco (2005), figuras 3 e 4, é observado um crescimento tanto da condutividade como da parte imaginária da admitância do solo com o aumento da frequência.

Figura 3: Resultados obtidos por Portela (1997).



Fonte: Portela (1997).

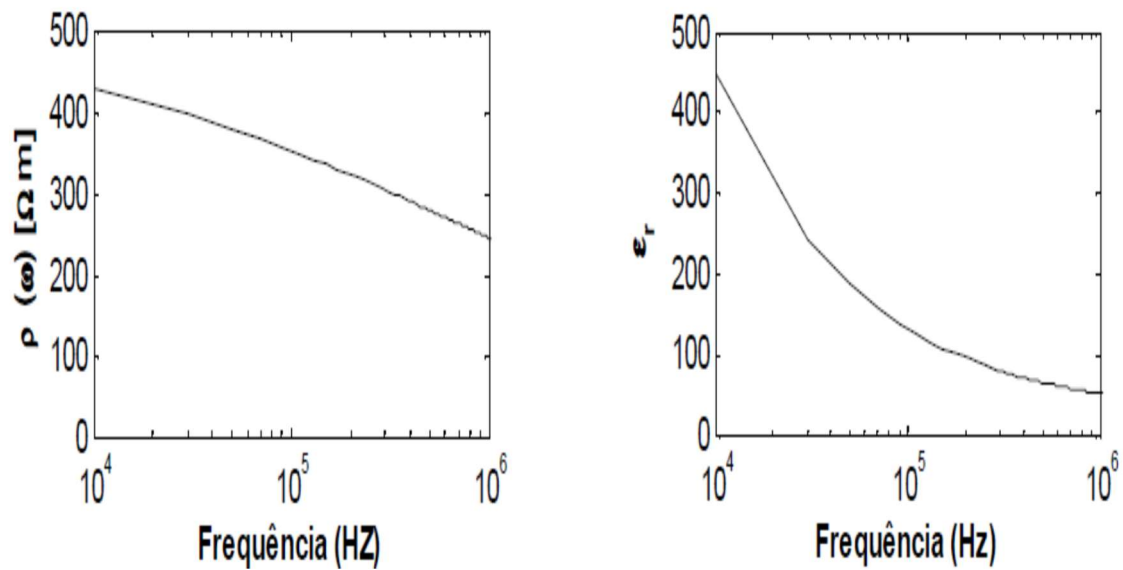
Figura 4: Resultados obtidos por Bosco (2005).

Freq. [Hz]	VE[mV]	VR [mV]	I [mA]	Δt [μs]	ϕ [$^{\circ}$]	σ [$\mu S/m$]	$\omega\epsilon$ [$\mu S/m$]
1000	664,00	1,700000	0,036957	0,0000000	0,00000	1669,72	0,00000
1585	678,00	1,180000	0,025652	0,0000000	0,00000	1131,71	0,00000
2500	691,00	1,180000	0,025652	16,000000	14,4689	1078,38	1611,82
3980	218,00 ^(*)	1,800000	0,039130	10,000000	14,3324	5217,32	846,729
6300	265,00 ^(*)	2,100000	0,045652	8,0000000	18,1723	4910,40	1260,80
10000	898,00	2,420000	0,052609	8,0000000	28,8012	1540,12	846,729
15000	985,00	3,200000	0,069565	6,4000000	36,5177	1702,77	1260,80
25000	1070,00	3,770000	0,081957	3,2000000	28,9384	2010,94	1111,86
40000	1094,00	4,580000	0,099565	3,8000000	54,4641	1586,89	2221,79
63000	1047,00	7,030000	0,152826	2,6000000	59,0612	2251,33	3755,92
100000	949,50	8,125000	0,176630	1,6800000	60,4839	2749,45	4856,46
160000	840,00	9,410000	0,204565	1,2000000	68,4721	2680,93	6796,23
240000	718,00	12,00000	0,260870	0,8000000	72,3476	3305,28	10386,6
400000	602,00	15,30000	0,332609	0,5500000	78,8313	3210,58	16261,3
630000	472,00	20,40000	0,443478	0,3500000	79,5071	5133,26	27715,8
1000000	391,00	28,50000	0,619565	0,2050000	73,8000	13262,4	45649,5
2000000	298,00	40,90000	0,889130	0,1040000	74,8800	23347,9	86411,1

Fonte: Bosco (2005)

Na figura 5 é apresentado os resultados obtidos por Silva (2013). É evidenciado uma diminuição tanto da resistividade como da permissividade relativa com o aumento da frequência.

Figura 5: Resultados obtidos por Silva (2013).



Fonte: Silva (2013)

2.3.1 PERMISSIVIDADE ELÉTRICA

A permissividade ϵ fornece uma medida da capacidade do meio de se polarizar sob a ação de um campo elétrico e da energia armazenada associada ao processo de polarização. A permissividade relativa (ϵ_r), normalmente chamada de constante dielétrica, é maior do que a unidade, representa o aumento na capacidade de armazenamento de carga pela inserção de um meio dielétrico e é dada pela equação (2) (Callister & Rethwisch, 2009):

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r + j\epsilon''_r \quad (2)$$

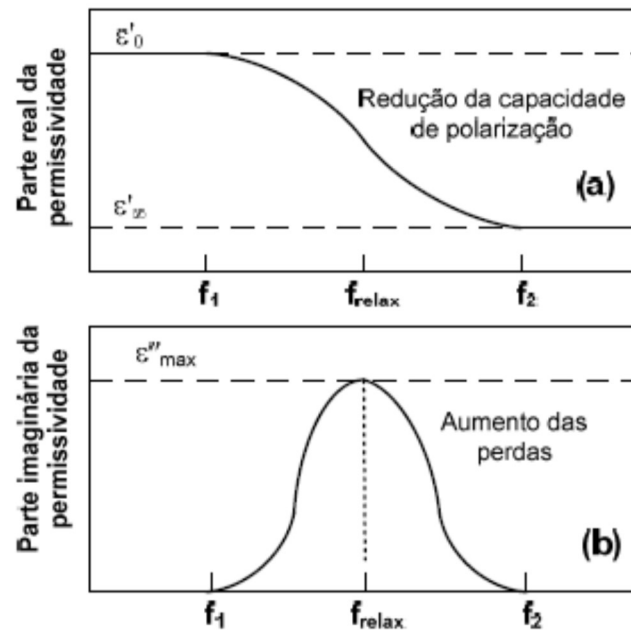
Onde:

- ϵ_r = permissividade relativa;
- ϵ = permissividade elétrica;
- ϵ_0 = permissividade do vácuo;
- ϵ'_r = parte real da permissividade relativa;
- ϵ''_r = parte imaginária da permissividade relativa.

A parte real da permissividade relativa (ϵ') é a medida de quanta energia de um campo elétrico externo é armazenada em um material. A parte imaginária (ϵ'') é chamada de fator de perda e é a medida da dissipação ou da perda de energia elétrica de um material quando submetido a um campo elétrico externo. O fator de perda inclui os efeitos da perda dielétrica e da condutividade elétrica.

Na faixa de baixas frequências, de 0 a 1 kHz, o dipolo é capaz de seguir as variações do campo aplicado e, como a velocidade dos elétrons é baixa, a maior parte da energia do campo é armazenada no meio e uma parcela muito pequena é dissipada na forma de calor (atrito). À medida que a frequência aumenta, há um crescimento das perdas em decorrência do aumento da velocidade dos dipolos e, portanto, uma redução proporcional da energia armazenada no meio. Do ponto de vista macroscópico, isso se traduz em um aumento de ϵ'' e em uma redução proporcional de ϵ' . Esse comportamento se mantém até que ϵ'' atinge um pico. Esse pico corresponde a uma frequência na qual o intervalo de tempo necessário para o dipolo se alinhar com o campo (frequência de relaxação f_{relax}) está exatamente sincronizado com o período do campo externo aplicado. Para essa frequência, as perdas por ciclo são máximas e a energia armazenada é basicamente a média dos limites de frequência inferior e superior, f_1 e f_2 . Aumentando-se a frequência a partir desse ponto, o dipolo não consegue mais acompanhar o campo aplicado sem desfasamentos. Tal fato provoca reduções adicionais na capacidade de polarização e de armazenamento de energia do meio e, portanto, reduções complementares de ϵ' . Também, depois de atingido o pico, há uma diminuição das perdas, já que, a despeito do aumento da velocidade de deslocamento do dipolo, a distância deslocada é paulatinamente reduzida até tender para zero em uma frequência superior, na qual, em decorrência de sua inércia, o dipolo não consegue sequer se mover em resposta às rápidas variações do campo. As Figuras. 6 (a) e 6 (b) ilustram, respectivamente, o comportamento de ϵ' e ϵ'' em função da frequência.

Figura 6: Representação esquemática do comportamento de (a) ϵ' e (b) ϵ'' considerando um meio submetido a um campo de frequência variável.



Fonte: Silva (2013).

2.3.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade, σ , é um parâmetro que caracteriza as propriedades condutoras de elétrons livres de um condutor. Materiais com valores muito baixos de condutividade são classificados como dielétricos (Balanis, 1989). A condutividade elétrica efetiva de um material é a medida da facilidade dos elétrons de viajarem pelo material sob a influência de um campo elétrico externo. É dada por:

$$\sigma = \sigma_0 + \omega\epsilon'' \quad (3)$$

Onde, σ_0 é a condutividade em baixa frequência.

A condutividade cresce com o aumento da frequência. O crescimento da condutividade efetiva está associado com o produto $\omega\epsilon''$. Pode-se inferir que a dependência da frequência da condutividade e da permissividade estão relacionadas entre si. Observe-se que a condutividade efetiva aumenta à medida que a parte real da permissividade diminui, como se um parâmetro estivesse sendo “transformado” no outro.

2.4 IMPULSO DE TENSÃO

Os sistemas elétricos estão submetidos esporadicamente a várias formas de fenômenos transitórios, envolvendo variações súbitas de tensão e corrente provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores. Tais fenômenos transitórios normalmente apresentam aspecto impulsivo e usualmente unidirecional.

Alguns parâmetros são importantes para se definir as características de um sinal impulsivo pleno, são eles:

- Tempo de frente (T_f): É definido como sendo $T_f = 1,67x(T_{90\%} - T_{30\%})$;
- $T_{30\%}$: tempo correspondente ao instante que o impulso atinge 30% da tensão de pico;
- $T_{90\%}$: tempo correspondente ao instante que o impulso atinge 90% da tensão de pico;
- Tempo de cauda (T_c): no impulso pleno é conhecido como o intervalo de tempo entre a origem virtual (O') e o instante equivalente á metade do valor de crista na cauda da onda, já no caso de um impulso cortado na cauda ou na frente, é o intervalo de tempo entre a origem virtual (O') e o momento que ocorre o corte da onda. ;
- Tempo de pico (T_p): corresponde ao tempo que a onda atinge o valor da tensão de pico;
- Origem virtual (O'): ponto definido na interseção entre o eixo x e a reta constituída pelos instantes $T_{30\%}$ e $T_{90\%}$;
- Tensão de pico (V_p): Tensão máxima visualizada no impulso de tensão, também conhecida como tensão de crista;
- Origem (O): Instante que o impulso de tensão começa a ser registrado.

Na Figura 7 é apresentado o gráfico de um impulso pleno com a indicação dos parâmetros citados.

Alguns valores típicos de impulsos de tensão são: sinais 8/20 μ s (representativos de descargas atmosféricas); e sinais 4/10 μ s (representativos de surtos provenientes de chaveamentos). Então, o primeiro valor da forma de onda indica o tempo de frente do sinal (4 e 8 μ s) e o segundo valor o tempo de meia cauda (10 e 20 μ s).

De acordo com a NBR 6939/99, os fenômenos transitórios impulsivos podem ser de frente lenta, frente rápida, frente muito rápida ou combinada.

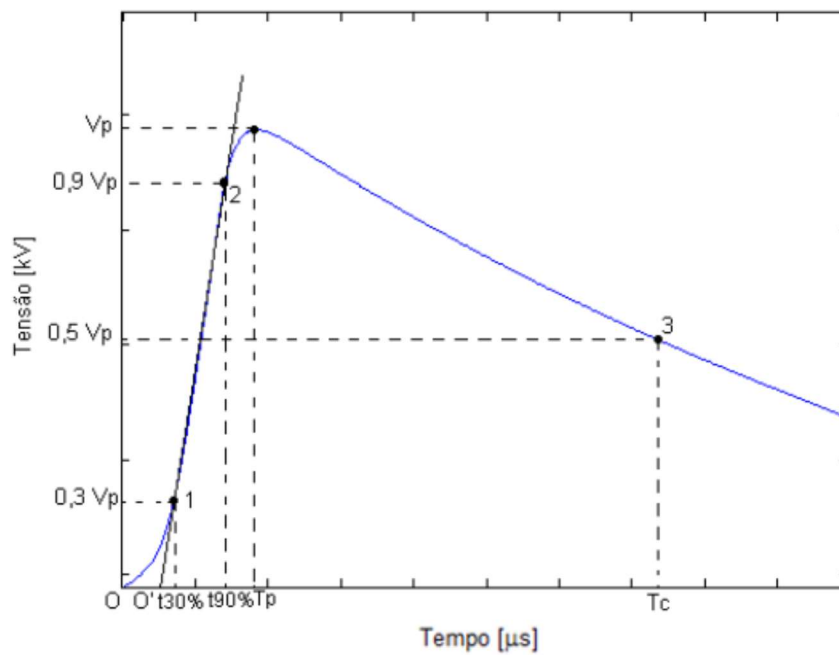
- **Frente lenta:** usualmente unidirecional, com tempo de frente tal que $20\mu\text{s} < T_1 \leq 5000 \mu\text{s}$, e tempo de meia cauda valor $T_2 \leq 20 \text{ ms}$. Podem originar-se de faltas, operações de chaveamento ou descargas atmosféricas diretas nos condutores de linhas aéreas;
- **Frente rápida:** usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$, e tempo até o meio valor (na cauda) $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$. Podem originar-se de operações de chaveamento, descargas atmosféricas ou faltas;
- **Frente muito rápida:** usualmente unidirecional, com tempo de frente tal que $T_1 \leq 0,1 \mu\text{s}$, duração total $T_t \leq 3 \text{ ms}$, e com oscilações superimpostas de frequências $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$. Podem originar-se de faltas ou operações de chaveamento em subestações isoladas a gás (GIS);
- **Combinada:** É uma combinação das demais. Podem ter qualquer uma das origens mencionadas acima. Ocorrem entre as fases de um sistema (fase-fase) ou na mesma fase entre partes separadas de um sistema (longitudinal).

2.4.1 FORMAS DE IMPULSO

1.1.1.1 IMPULSO PLENO

A principal característica de um impulso de tensão pleno é a inexistência de uma interrupção repentina causada por uma descarga disruptiva, sendo representado por uma onda completa. Este tipo de descarga está associado à falha do isolamento do equipamento diante de uma perturbação elétrica (Cunha, 2014). Na figura 7 é mostrado um impulso de tensão pleno.

Figura 7: Impulso de tensão pleno.

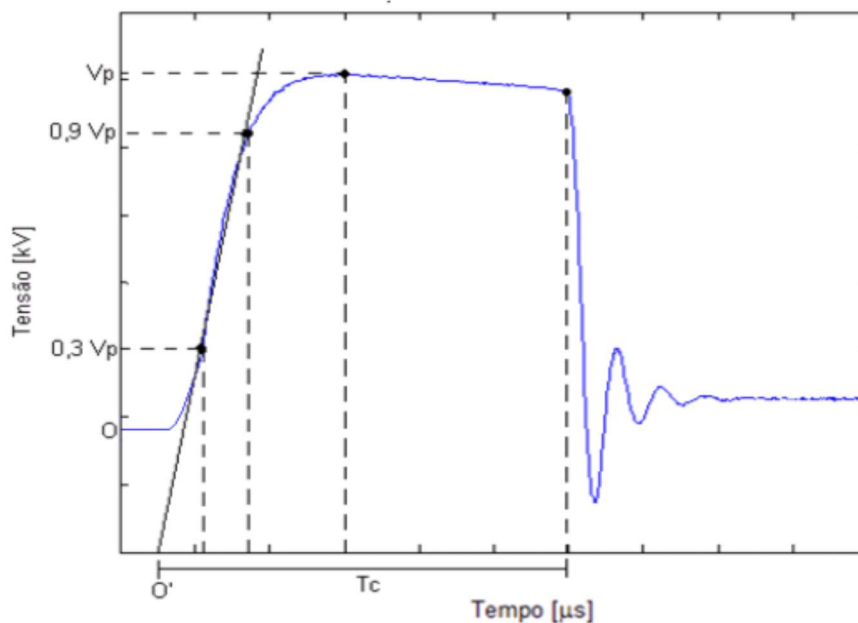


Fonte: Cunha (2014).

1.1.1.2 IMPULSO CORTADO NA CALDA

O impulso cortado na cauda (Figura 8) possui como característica uma interrupção por uma descarga disruptiva, causando uma queda brusca de tensão até um valor nulo. Nessa queda pode haver o surgimento de oscilações, sendo a mesma demonstrada por um corte na forma de onda, que ocorre na cauda do impulso de tensão.

Figura 8: Impulso de tensão cortado na cauda.

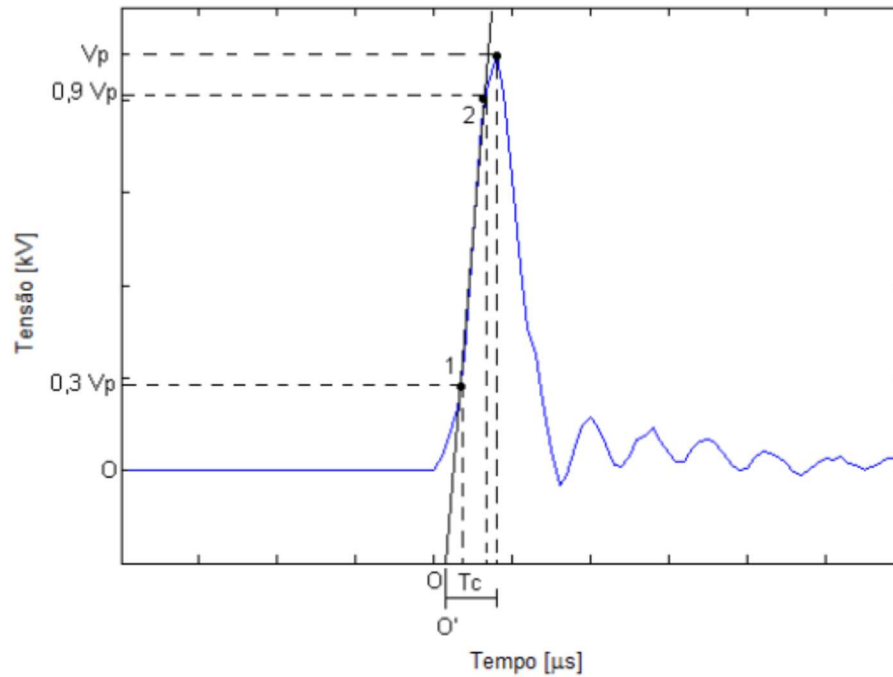


Fonte: Cunha (2014).

1.1.1.3 IMPULSO CORTADO NA FRENTE DA ONDA

Existe ainda mais um tipo, denominado impulso cortado na frente da forma de onda (Figura 9). Este é caracterizado por uma interrupção repentina na tensão, antes de o impulso alcançar seu valor de tensão máxima.

Figura 9: Impulso de tensão cortado na frente de onda.

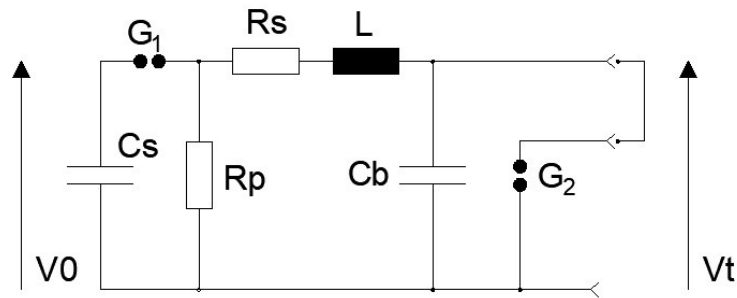


Fonte: Cunha (2014)

2.4.2 PRINCÍPIO DE GERAÇÃO DE IMPULSO DE TENSÃO

É possível obter impulsos de tensão com diferentes tempos de frente e diversas amplitudes, bastando, para tal, realizar o ajuste adequado dos elementos resistivos, indutivos e capacitivos do circuito. O esquema representativo do circuito elétrico do gerador é apresentado na Figura 10.

Figura 10: Esquema representativo do circuito elétrico do gerador.



Fonte: Adaptada da figura presente no gerador de impulso pertencente ao LAT/UFCG.

Nesse gerador de estágio simples, o capacitor C_s é carregado por uma fonte de alimentação de tensão contínua até que o *gap* seja rompido, criando assim um arco voltaico. Esse *gap* funciona como um limitante de tensão e até mesmo como um sensor de tensão, pois a distância do *gap* está diretamente ligada à rigidez dielétrica do ar, que só será rompido quando atingida a tensão de ruptura.

Ao ser rompido a rigidez dielétrica do ar, o *gap* G_1 permite que o capacitor de carga C_s descarregue a sua energia armazenada no restante do circuito, responsável pela forma de onda desejada. O capacitor C_b , ao ocorrer o rompimento do *gap* G_1 , será carregado até que o nível de tensão se iguale à do capacitor C_s . Neste momento, a crista ou o valor de pico do impulso é atingido e este intervalo entre a origem e o pico é conhecido como frente de onda.

A partir do pico, como os capacitores estão com um mesmo nível de tensão, começa então a descarga dos mesmos, e essa descarga corresponde à cauda do impulso, onde o ponto nessa cauda que corresponde a 50 % do valor de pico é conhecido como tempo de cauda.

Os resistores R_p , R_s e a capacitância C_b , são responsáveis pela conformação da onda de tensão resultante. O resistor R_s do circuito gerador controla o tempo de frente e o resistor R_p é responsável pelo descarregamento do capacitor C_b , basicamente determinando o tempo de cauda (T_c). A capacitância C_s tem valor muito superior ao da capacitância C_b . A indutância L do circuito pode influenciar muito na forma de onda e, por isto, deve ser mantida tão baixa quanto possível. O *gap* G_2 é usado para obter um impulso cortado na cauda.

3 MATERIAL E MÉTODOS

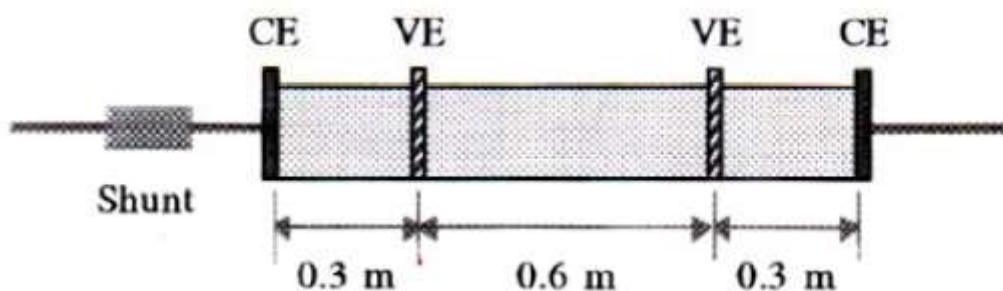
Neste capítulo são descritos material e métodos empregados nas medições em laboratório, com o objetivo de analisar o comportamento dos parâmetros elétricos do solo submetido a impulsos de tensão.

Nos ensaios são utilizados um gerador de impulso de tensão, um osciloscópio digital, uma década resistiva e um sistema desenvolvido para realizar ensaios de condutividade e permissividade elétrica no solo.

3.1 METODOLOGIA

Foi desenvolvido um sistema para realizar a medição baseado no método apresentado por Portela (1999), que consiste em adaptar dois eletrodos de placas de cobre (CE) nas extremidades de uma amostra de solo, inserir dois eletrodos cilíndricos de tensão (VE) para medição da queda de tensão na amostra, impor uma corrente através de um gerador de sinal com frequência variável e obter a corrente a partir da queda de tensão do resistor *shunt*. A representação esquemática deste método é mostrada na Figura 11.

Figura 11: Representação esquemática do solo para medição.

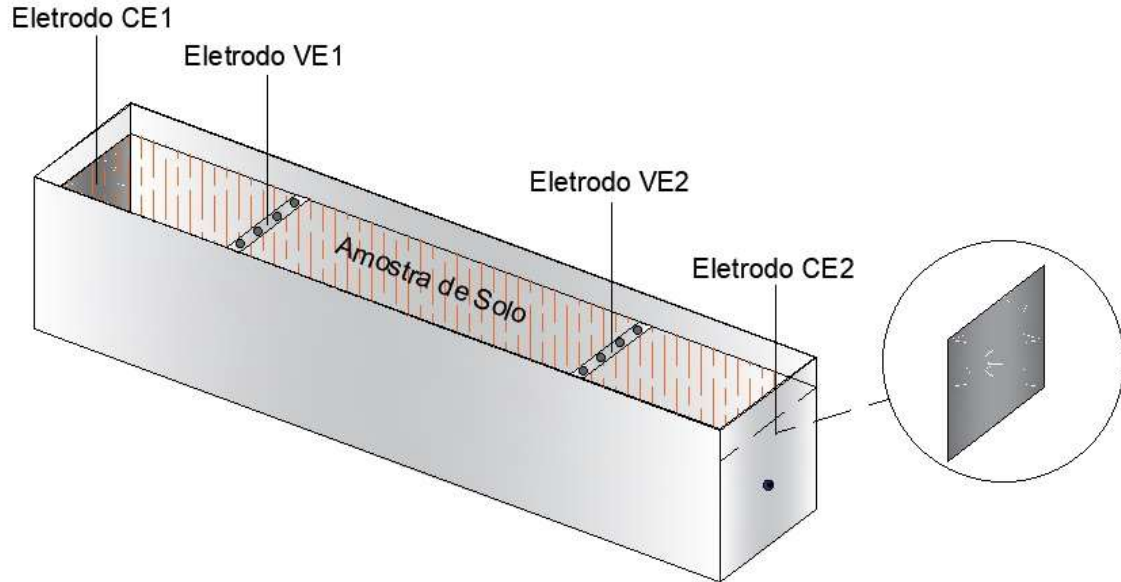


Fonte: Portela (1999).

O sistema desenvolvido consiste em uma caixa de madeira para compactar a amostra do solo de comprimento 1,20 m e área da seção transversal de 0,06 m², com eletrodos de placas de alumínio nas extremidades para a aplicação do impulso de tensão (CE1 e CE2) e dois eletrodos para medição da queda de tensão na amostra do solo (VE1

e VE2). O eletrodo VE1 foi colocado a 0,3 m de CE1 e o eletrodo VE2 a 0,3 m de CE2. O sistema é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Sistema para ensaio dos parâmetro elétricos do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros elétricos foram calculados com base na formulação matemática utilizada por Silva (2010), a qual foi obtida considerando um eletrodo para a aplicação de tensão no formato de uma cuba semiesférica. Considerando a geometria dos eletrodos CE1 e CE2, os cálculos foram refeitos e obteve-se uma nova expressão matemática para obtenção dos valores de condutividade e permissividade elétrica em função da frequência. Os cálculos são apresentados a seguir.

A corrente que passa pelo solo é composta por uma parcela de natureza condutiva e outra capacitiva, cujas densidades estão relacionadas ao campo elétrico, no domínio da frequência, por:

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} = (\sigma + j\omega \epsilon) \vec{E} \quad (4)$$

em que \vec{J} é a densidade de corrente total, \vec{J}_c é a densidade de corrente de condução e \vec{J}_d é a densidade de corrente capacitiva ou de deslocamento. Na equação (4) supõe-se o solo como um meio linear, isotrópico e representado, aproximadamente, por uma resistividade ($\rho = 1/\sigma$) e permissividade (ϵ) elétricas equivalentes. Tendo em conta a geometria do

sistema, a densidade de corrente total pode ser escrita, para cada frequência, em função da transformada de Fourier da corrente impulsiva $i(t)$ na amostra do solo:

$$\vec{j} = \frac{I(\omega)}{S} \vec{l} \quad (5)$$

sendo $I(\omega)$ a transformada de Fourier de $i(t)$, S é a área do eletrodo de aplicação de tensão (CE), e \vec{l} é o vetor unitário perpendicular à área S . Substituindo-se (5) em (4), tem-se:

$$\vec{E} = \frac{I(\omega)}{S} \frac{1}{(\sigma + j\omega\epsilon)} \vec{l} \quad (6)$$

A diferença de potencial entre os eletrodos de medição de tensão (VE1 e VE2) pode ser calculada a partir da integral de linha de (6) entre os pontos l_1 , que corresponde a distância entre CE1 e VE1, e l_2 , correspondente a distância entre CE1 e VE2:

$$V_1(\omega) - V_2(\omega) = \int_{l_1}^{l_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{I(\omega)}{S(\sigma + j\omega\epsilon)} l \quad (7)$$

em que $V_1(\omega)$ é a transformada de Fourier da tensão no eletrodo VE1, $V_2(\omega)$ é a transformada de Fourier da tensão no eletrodo VE2, e $l = l_2 - l_1$.

A partir de (7), pode-se determinar a impedância $Z_{12}(\omega)$ da porção da amostra do solo compreendida entre VE1 e VE2, definida como a razão entre a diferença dos fasores de tensão $V_1(\omega)$ e $V_2(\omega)$ e o fasor da corrente $I(\omega)$:

$$Z_{12}(\omega) = \frac{V_1(\omega) - V_2(\omega)}{I(\omega)} = \frac{1}{(\sigma + j\omega\epsilon)} \frac{l}{S} \quad (8)$$

e a admitância $Y_{12}(\omega)$ correspondente:

$$Y_{12}(\omega) = (\sigma + j\omega\epsilon) \frac{S}{l} \quad (9)$$

Os parâmetros σ e ϵ podem ser derivados diretamente da equação (9) como:

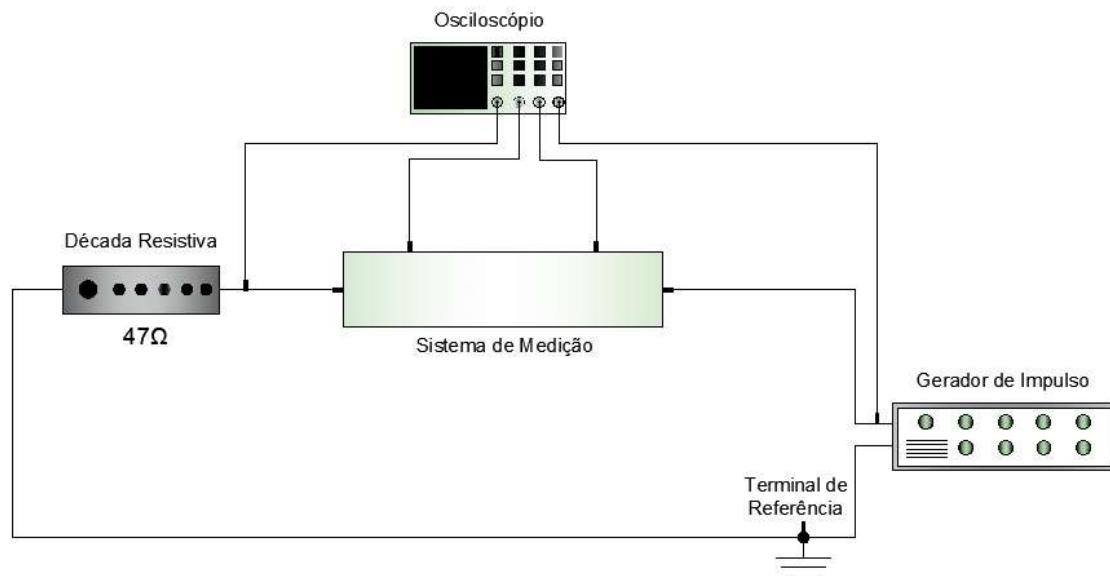
$$\sigma(\omega) = \operatorname{Re}\{Y_{12}(\omega)\} \frac{S}{l} \quad (10)$$

$$\varepsilon(\omega) = \operatorname{Im}\{Y_{12}(\omega)\} \frac{S}{\omega l} \quad (11)$$

em que $\operatorname{Re}\{Y_{12}(\omega)\}$ e $\operatorname{Im}\{Y_{12}(\omega)\}$ correspondem, respectivamente, às partes real e imaginária da admitância $Y_{12}(\omega)$.

Para realizar a análise dos parâmetros elétricos do solo, foram aplicados impulsos de tensão plenos e cortados na calda com diferentes configurações de tempo, e, utilizando um osciloscópio digital, foi medida a tensão nos eletrodos VE1 e VE2, a tensão de saída no gerador de impulso e a queda de tensão na resistência de 47Ω para a obtenção da corrente injetada na amostra do solo. Todos os cálculos foram realizados utilizando o *software* Matlab. O esquema de medição é apresentado na Figura 13 e a fotografia da montagem é mostrada na Figura 14.

Figura 13: Esquema para a realização da medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14: Fotografia da montagem para realização das medições.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MATERIAL

3.2.1 GERADOR DE IMPULSO

Para a aplicação dos impulsos de tensão na amostra de solo, foi utilizado o *recurrent surge generator* modelo 481 da *Haefely* pertencente ao LAT/UFCG (Laboratório de Alta Tensão/Universidade Federal de Campina Grande). Na Figura 15 é mostrada a fotografia do gerador utilizado.

Figura 15: Fotografia do gerador de impulso utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

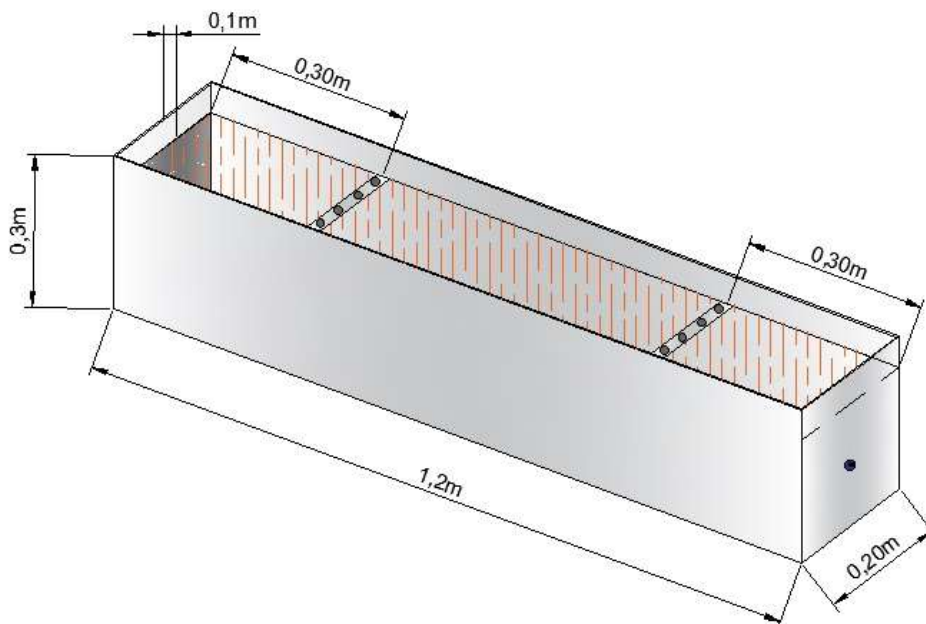
3.2.2 SISTEMA DESENVOLVIDO PARA REALIZAR ENSAIO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO

O sistema desenvolvido consiste em uma caixa de madeira de geometria similar a um paralelepípedo e de eletrodos para a aplicação e medição de tensão. As dimensões foram escolhidas com base na metodologia proposta por Bosco (2005). As partes constituintes são:

- Caixa de madeira para comportar o solo;
- 2 eletrodos para aplicação de tensão na amostra de solo;
- 2 eletrodos para medição de tensão na amostra de solo.

O sistema tem um comprimento de 1,20 m, 0,20 m de largura e 0,30 m de altura. Os eletrodos para aplicação de tensão estão localizados nas extremidades da caixa, enquanto que os eletrodos para medição de tensão são alocados no solo, a uma distância de 0,3 m dos eletrodos para aplicação de tensão e a 0,6 m entre si. É necessária uma quantidade de solo suficiente para encobrir totalmente os eletrodos para aplicação de tensão. O sistema, bem como suas dimensões, é mostrado nas Figuras 16 e 17.

Figura 16: Sistema desenvolvido com a indicação das dimensões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

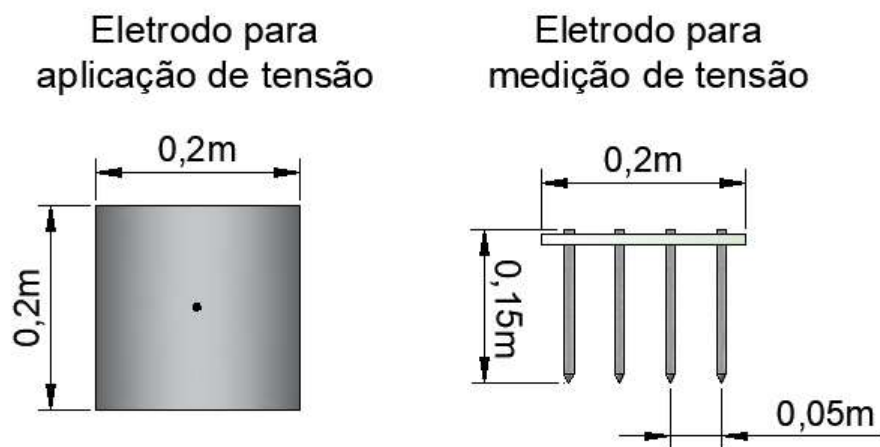
Figura 17: Fotografia do sistema desenvolvido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os elétrodos para aplicação de tensão consistem em chapas de alumínio quadradas. Já os eletrodos para a medição de tensão, consistem em 4 hastes cilíndricas de aço igualmente espaçadas fixadas a uma placa de alumínio. As configurações dos eletrodos são mostradas nas Figuras 18 e 19.

Figura 18: Eletrodos para aplicação e medição de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

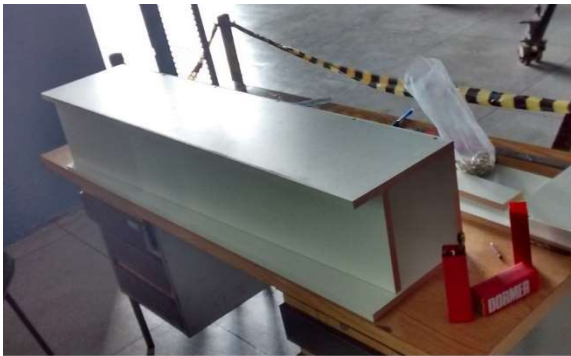
Figura 19: Fotografia dos eletrodos para aplicação e medição de tensão.



Fonte: elaborado pelo autor.

Todo o processo de construção foi realizado no LAT/UFCG. Os eletrodos de placas de alumínio e os eletrodos cilíndricos para medição da queda de tensão na amostra de solo foram feitos utilizando materiais encontrados no próprio laboratório. Fotografias do processo de construção são mostradas na Figura 20. A Figura 20 (a) mostra a fotografia da etapa de montagem da caixa na qual será comportada a amostra de solo e fixados os eletrodos para aplicação de tensão. A Figura 20 (b) mostra a fotografia do eletrodo para aplicação de tensão fixado na caixa. As Figuras 20 (c) e 20 (d) mostram as fotografias do processo de construção dos eletrodos para medição de tensão e dos eletrodos para aplicação de tensão respectivamente.

Figura 20: Fotografias: (a) etapa de montagem da caixa; (b) eletrodo para aplicação de tensão fixado na caixa; (c) processo de construção dos eletrodos para medição de tensão; (d) processo de construção dos eletrodos para aplicação de tensão.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 O SOLO UTILIZADO

O solo utilizado para os ensaios encontra-se nas proximidades do LAT, na cidade de Campina Grande, localizada no Agreste da Borborema. Segundo informações publicadas no portal eletrônico do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) no ano de 2015, Campina Grande tem o clima quente e úmido, caracteriza-se por apresentar chuvas concentradas nos meses de outono e inverno e um período de estiagem de 5 a 6 meses. O período seco começa em novembro e prolonga-se até o mês de fevereiro, sendo o mês de novembro o mais seco. Por sua vez, a estação chuvosa inicia em abril e termina

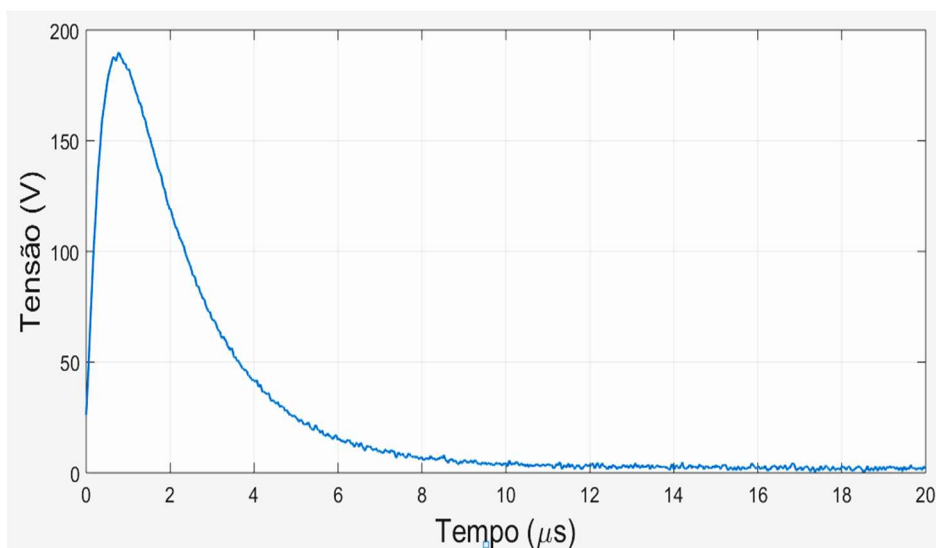
em agosto, sendo o mês de julho o de maior precipitação. As temperaturas médias anuais são elevadas e variam de 22 °C a 26 °C e a umidade relativa do ar não é uniforme, variando de 45% a 90% ao longo do dia.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises sobre os ensaios realizados na amostra do solo.

Foram aplicados impulsos de tensão pleno e cortado na cauda com diferentes configurações de tempo. No impulso de tensão pleno com um tempo de frente de 0,63 μs e tempo de cauda de 2,45 μs , foi possível obter valores confiáveis dos parâmetros elétricos da amostra do solo em uma faixa de frequência de 975,6 kHz, de 24,4 kHz a 1 MHz. Devido às limitações técnicas do instrumento de medição utilizado, não foi possível observar o comportamento da condutividade e da permissividade para outras faixas de frequência diferentes da citada anteriormente. Nos demais sinais os resultados foram imprecisos, observou-se a presença de ruído e um comportamento diferente do visto teoricamente. O impulso de tensão de configuração 0,63/2,45 μs aplicado é mostrado na Figura 21. O sinal tem amplitude máxima de 190 V.

Figura 21: Impulso de tensão aplicado na amostra do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar a influência da preservação da estrutura original do solo na condutividade, aplicou-se sinais impulsivos diretamente no solo e observou-se a impedância impulsiva (Z_p) do mesmo.

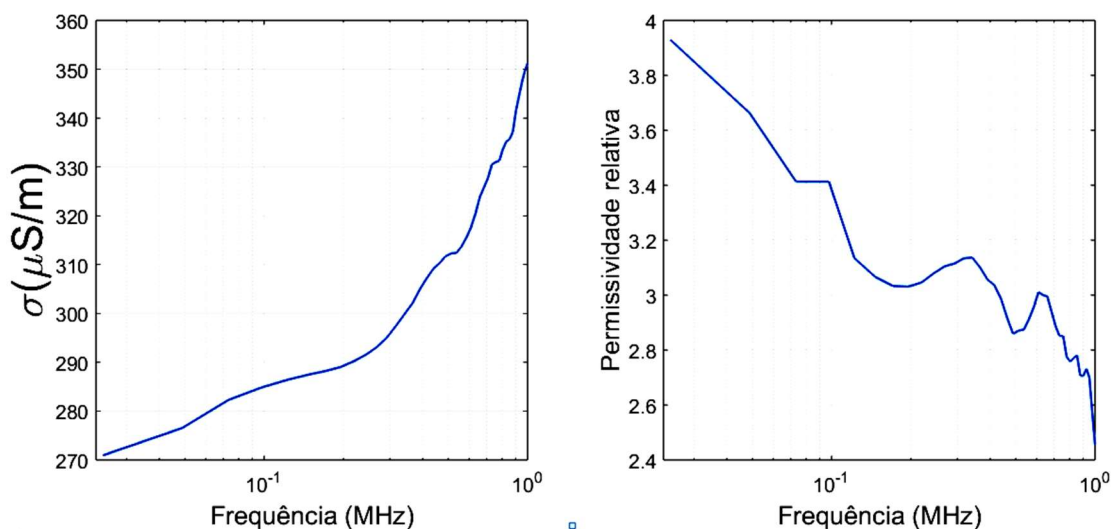
O capítulo foi dividido em dois tópicos, no primeiro é feito a análise dos valores dos parâmetros elétricos obtidos, e o segundo trata da influência da preservação da estrutura física original do solo nos resultados.

4.1 ANÁLISE DOS VALORES DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS

OBTIDOS

A figura 22 apresenta os gráficos dos valores de condutividade e permissividade relativa da amostra do solo em função da frequência quando submetido ao impulso de tensão de configuração 0,63/2,45 μ s apresentado anteriormente.

Figura 22: Gráficos da condutividade e permissividade relativa da amostra do solo em função da frequência:



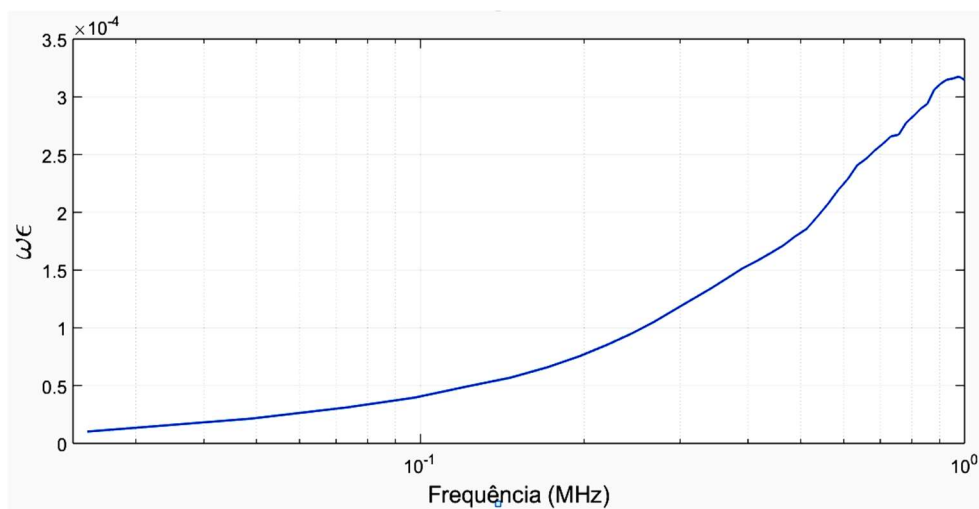
Fonte: Elaborado pelo autor.

É observado um aumento da condutividade com a frequência, variando de 270 μ S/m em 24,4 kHz a 351,3 μ S/m em 1 MHz, a variação é mais acentuada a partir de 290 kHz. Isto indica que os elétrons viajam com mais facilidade pelo solo na medida em que a frequência cresce, implicando em uma diminuição da resistividade.

Para a permissividade relativa, é observada uma diminuição da mesma com o aumento da frequência, variando de 3,93 em 24,4 kHz a 2,45 em 1 MHz. Portanto, há uma diminuição da capacidade do solo de se polarizar quando a frequência cresce.

Na Figura 23 é apresentado o gráfico da parte imaginária da admitância da amostra do solo ($\omega\epsilon$).

Figura 23: Gráfico da parte imaginária da admitância da amostra do solo ($\omega\epsilon$) em função da frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento observado dos parâmetros elétricos da amostra do solo é similar aos resultados apresentados por Portela (1997) e Bosco (2005), mostrados nas Figuras 2 e 3. Em ambos os trabalhos é verificado um crescimento da condutividade e da parte imaginária da admitância ($\omega\epsilon$) com a frequência.

Também, de modo semelhante aos resultados obtidos neste trabalho, é evidenciado nos resultados obtidos por Silva (2013), apresentados na Figura 4, uma diminuição tanto da resistividade como da permissividade relativa com o aumento da frequência.

O comportamento dos parâmetros elétricos da amostra do solo com a frequência foi similar aos encontrados nos trabalhos citados, porém os valores foram consideravelmente inferiores. Isso ocorreu pois foram usados solos de tipos distintos do utilizado neste trabalho, não foi usada a mesma metodologia nos ensaios, não houve a preservação das características físicas do solo neste trabalho e nem mesmo a compactação da amostra do mesmo.

4.2 INFLUÊNCIA DA PRESERVAÇÃO DA ESTRUTURA FÍSICA ORIGINAL DO SOLO NOS RESULTADOS OBTIDOS.

Para analisar a influência da preservação da estrutura física original do solo nos resultados obtidos, aplicou-se, primeiramente, um impulso de tensão diretamente no solo e realizou-se a medição da queda de tensão e da corrente no mesmo. Para isso foram cravadas quatro hastes diretamente no solo, as duas hastes centrais foram utilizadas para a medição da queda de tensão e as duas hastes laterais para a aplicação do impulso de tensão. As hastes foram espaçadas de forma idêntica ao espaçamento dos eletrodos do sistema para ensaios dos parâmetros elétricos do solo desenvolvido, e cravadas até a profundidade de 20 cm. Para obter a corrente, mediu-se a queda de tensão na década resistiva. A Figura 24 mostra a fotografia da montagem efetuada para a realização das medições.

Figura 24: Fotografia da montagem para o ensaio diretamente no solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, foi retirado uma amostra do solo do mesmo local onde foram cravadas as hastes para ser realizado o ensaio no sistema desenvolvido.

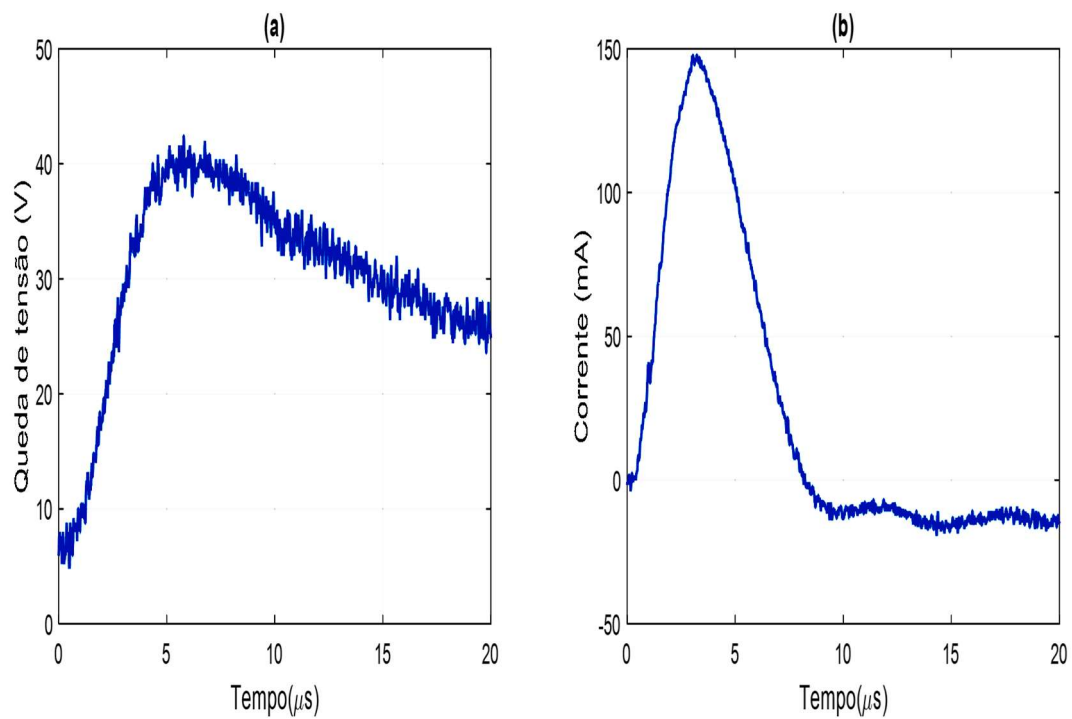
A grandeza utilizada para comparar o comportamento do solo original com o comportamento da amostra retirada é a impedância impulsiva (Z_p), que é uma grandeza escalar, conceituada no domínio do tempo, dada pela razão entre o pico da queda de tensão no solo (V_p) e a corrente de pico medida (I_p) como pode ser observado na

Equação 12. Essa grandeza está relacionada com a condutividade, de modo que quanto maior for Z_p , menor é a condutividade.

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (12)$$

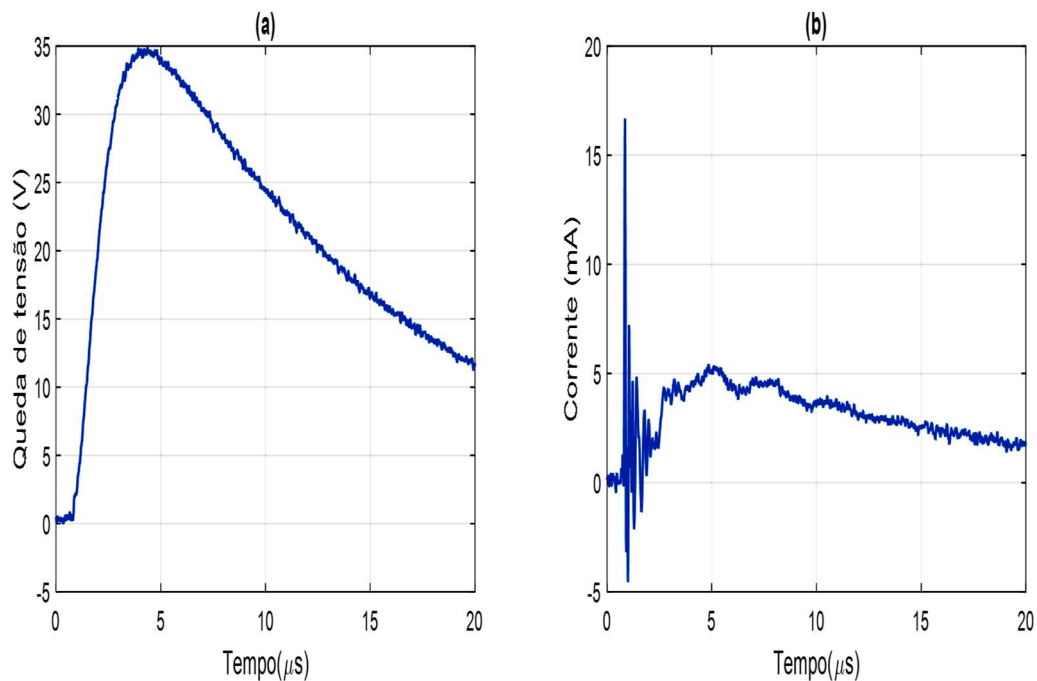
Os sinais de tensão e corrente medidos diretamente no solo e na amostra retirada do mesmo local são mostrados nas Figuras 25 e 26 respectivamente.

Figura 25: Gráfico das medições da (a) Queda de tensão e (b) corrente feitas no ensaio realizado diretamente no solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26: Gráfico das medições da (a) Queda de tensão e (b) corrente feitas no ensaio realizado no sistema desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das medições realizadas no ensaio diretamente no solo, obteve-se um valor de Z_p igual a $276,4 \Omega$. Já no ensaio realizado no sistema desenvolvido, foi obtido um valor de Z_p igual a $6423,9 \Omega$, ou seja, um aumento de aproximadamente 23 vezes no valor da impedância impulsiva. Isto mostra que a preservação das características físicas do solo tem um impacto significativo nos resultados obtidos.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a análise dos parâmetros elétricos do solo (condutividade e permissividade elétrica) quando submetido à impulsos de tensão. Para isso foi desenvolvido um sistema para realização dos ensaios no solo. A amostra de solo utilizada foi coletada nas proximidades do LAT/UFCG, na cidade de Campina Grande.

Ficou evidente a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo. A condutividade apresentou um aumento do seu valor com o crescimento da frequência, enquanto que houve uma diminuição do valor da permissividade.

A amostra do solo apresentou baixos valores de condutividade e permissividade. Os resultados evidenciam que a metodologia utilizada neste trabalho é satisfatória para analisar o comportamento dos parâmetros elétricos do solo no que diz respeito a como eles variam com a frequência. Entretanto não serve para determinar os valores reais dos mesmos, visto que ao ser retirada a amostra do solo não foi preservada a estrutura física original do mesmo e, por isso, observou-se valores de condutividade e permissividade consideravelmente abaixo do esperado.

Portanto, para mitigar as limitações do sistema desenvolvido, é necessário que a amostra do solo tenha sua estrutura física preservada durante a coleta ou ser realizada a compactação da mesma, de modo que tenha uma estrutura física semelhante à do solo original.

Como continuação do estudo aqui realizado, propõe-se o aperfeiçoamento do sistema para ensaios dos parâmetros elétricos do solo desenvolvido, adicionando um mecanismo para realizar a compactação da amostra do solo de modo a fazer com que a sua estrutura física se assemelhe a do solo original.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 10520:2002 - Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 7). ABNT.

ABNT. NBR 7117:2012-Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. [S.l.]: ABNT, 2012.

ALÍPIO, R; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 55, no. 1, pp. 132-139, 2013.

A. C. Balanis, *Advanced engineering electromagnetic*, John Wiley & Sons, New York, 1989.

AGILENT TECHNOLOGIES (2005). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Material. Application note 1217-1. 5989-2589EN, USA.

BOSCO, J. G.. Comportamento Eletromagnético do Solo no Domínio da Frequência: Tratamento de Dados de Campo e Influência no Desempenho de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. 107 páginas. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC), UNICAMP, Campinas, 2005.

CALLISTER, W. D. e RETHWISCH, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering: an Introduction*. 8th edition, John Wiley & Sons, USA.

CAGIDO, M. C. Impulso Atmosférico em Laboratório – Aplicação, Medição e Interpretação. 2014. 133 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

CUNHA, M. C.. Impulso Atmosférico em Laboratório- Aplicação, Medição e Interpretação. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Fevereiro 2014.

FREITAS, M. B. R.. Avaliação da Impedância Impulsiva em um Sistema de Aterramento. 65 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2015.

FLEURY, J. M. Curso de geologia básica. [S.l.]: Editora UFG, 1995.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento elétrico. 5a edição. ed. [S.l.]: Sagra Luzzatto, 2011.

LAILA, M. F. O.. "Estudo de Aterramentos Elétricos em Baías Frequências Utilizando o Método sem Malha". 79 páginas. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, UFSJ, São João del-Rei, 2016.

LUIZ, R. S. N.. "Análise de Sistemas de Aterramento Sob Solicitações impulsivas: Otimização e Critérios de Segurança em Aterramento de Estruturas de Linhas de Transmissão". 145 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

LUIZ, A. P.. Método para Determinação da Permissividade Elétrica e Permeabilidade Magnética de Materiais Isotrópicos com Suporte Computacional. 157 páginas. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em computação aplicada, IMPE, São José dos Campos, 2010.

PABLO, R. S. B.. "Simulação de ensaio de impulso atmosférico em transformadores de baixa indutância utilizando circuito Glaninger e programa ATP para o laboratório de extra alta tensão da UFPA". 90 páginas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA. UFPA, Belém, 2017.

PEREIRA, B. S.. "Modelagem e solução de Aterramentos sujeitos a surtos de corrente: respostas nos domínios da frequência e do tempo". 108 páginas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação. UFG. Goiânia. 2016.

Portela, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - II Practical Application Examples", Anais do 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp 380-384, Agosto 1997, EUA.

RAMÓN, H.M.M. "Estudo do comportamento das tensões transitórias em malhas de aterramento diante descargas atmosféricas". 89 páginas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2005.

S. Visacro, Aterramentos Elétricos, São Paulo, Brasil: Artiliber, 2002.

S. Visacro e R. Alípio, "Resposta transitória de eletrodos de aterramento: uma avaliação experimental do efeito da dependência com a frequência da resistividade e da permissividade elétricas," em XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, Brasil, Out. 2011.

SILVA, R.A.. "Dependência da Frequência dos Parâmetros do solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos". 75 páginas. Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2013.

ULABY, F. T. (2004). Fundamentals of Applied Electromagnetics. 2004 media edition, USA, Cap. 4, p.156.